Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 16, No. 2, 2024, p. 265-286

Investigation of Biochar Application Effect on Photosynthetic Pigments, Enzymes Activity and Yield of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under Water Stress

Marzieh Ghaedi[1], Ehsan Bijanzadeh[2*], Mahdi Najafi Ghiri[4], Ali Behpouri[3] and Vahid Barati[3]

1, 2 and 3- M.Sc. Student, Associate Professor and Assistant Professor, Agroecology Department, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Iran, respectively.
4- Associate Professor, Soil Science Department, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Iran.
(*- Corresponding author's Email: bijanzd@shirazu.ac.ir)

Received: 23-12-2022
Revised: 26-02-2023
Accepted: 18-04-2023
Available Online: 18-04-2023

How to cite this article:
Ghaedi, M., Bijanzadeh, E., Najafi Ghiri, M., Behpouri, A., & Barati, V. (2024). Investigation of biochar application effect on photosynthetic pigments, enzymes activity and yield of safflower under water stress. *Journal of Agroecology*, *16*(2), 265-286. (In Persian with English abstract).
https://doi.org/10.22067/agry.2023.79904.1134

Introduction

Water stress is one of the main factors in crop growth in arid and semi-arid regions of the world, which limits the grain yield of the safflower (*Carthamus tinctorius* L.). To increase the soil fertility and yield of crops, it is necessary to pay sufficient attention to the use of biomass of organic matter, especially crop residues, and its conversion to biochar. This research aims to evaluate the biochar application produced from cotton and wheat residues under late-season water stress in the south of Fars province (Darab) on photosynthetic pigments, enzyme activity, yield components, and yield of safflower.

Materials and Methods

In order to investigate the biochar application and water stress on the amount of photosynthetic pigments, enzyme activity, and yield of safflower, a field experiment was laid out as split plots in the form of randomized complete block design with 3 replications in the 2019-2020 growing season. The experimental factors include the irrigation regime as the main factor in two levels (optimal irrigation and cutting off irrigation after the flowering stage), and the secondary factors were fertilizer treatment as subplot including control (without fertilizer), consumption of 3 tons of biochar from wheat residues per hectare, consumption of 3 tons of biochar from cotton residues per hectare, consumption of 150 kg of urea per hectare + 50 kg of triple superphosphate per hectare, consumption of 112.5 kg of urea per hectare + 37.5 kg of triple superphosphate per hectare, consumption of 112.5 kg of urea + 37.5 kg of triple superphosphate + 3 tons wheat biomass per hectare, and 112.5 kg of urea + 37.5 kg of triple superphosphate + 3 tons of cotton biomass per hectare. In this research, chlorophyll a and b, total chlorophyll, catalase, and peroxidase activities, yield components, and yield of safflower were calculated.

https://doi.org/10.22067/agry.2023.79904.1134

Results and Discussion

The results of the experiment showed that the measured traits were significantly affected by the irrigation regime and fertilizer treatment. Under cutting-off irrigation after the flowering stage, the fertilizer treatment of 112.5 urea + 37.5 phosphate + 3 tons of wheat biochar per hectare increased 55 and 40% chlorophyll a and total chlorophyll compared to the control, respectively. Water stress increased the carotenoid content, catalase, and peroxidase enzymes. The highest amount of catalase and peroxidase enzyme activity was obtained in the control under cutting-off irrigation after the flowering stage, which increased by 48 and 38%, respectively, compared to the control under optimal irrigation. The number of seeds per capitule and the number of fertile capitules per plant in the treatment of 112.5 urea + 37.5 phosphate + 3 tons of cotton biochar under water stress conditions increased by 8.8 and 19.51%, respectively. Also, under water stress, the application of 112.5 urea + 37.5 phosphates + 3 tons of cotton biochar improved and increased the relative content of leaf water, biological capitules yield, and grain yield compared to the control by %53, %22, and %34, compared to control, respectively.

Conclusion

Results showed that in both of the irrigation regimes, application of 3 tons of cotton or wheat biochar alone can increase the biomass and grain yield compared to control. Overall, the application of 112.5 urea + 37.5 phosphate + 3 tons of cotton biochar under water stress conditions improved the relative water content of the leaves, the number of seeds per capitule, the number of fertile capitule per plant, and finally, biomass and yield of safflower. With respect to water shortage under late season in southern parts of Fars province, and in order to decrease the detrimental effects of water stress, farmers can use the biochar of cotton combined with reduced dosage of urea and triple superphosphate fertilizers.

Keywords: Catalase, Chlorophyll, Cutting off irrigation, Number of seed per capitule, Peroxidase

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۶، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ص ۲۸۶-۲۶۵

بررسی اثر مصرف زغال زیستی روی رنگیزه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیمی و عملکرد گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) در شرایط تنش آبی

مرضیه قائدی[1]، احسان بیژن‌زاده[2]*، مهدی نجفی قیری[4]، علی بهپوری[3] و وحید براتی[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۹

چکیده

به‌منظور بررسی مصرف زغال زیستی و تنش آبی بر ویژگی‌های بیوشیمیایی و عملکرد گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) پژوهشی به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دانشگاه شیراز در فصل رشد ۹۹- ۱۳۹۸ اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل رژیم آبیاری (آبیاری مطلوب و قطع آبیاری پس از گل‌دهی) و تیمار کودی شامل شاهد بدون کود، مصرف سه تن زغال زیستی گندم و یا پنبه در هکتار، ۱۵۰ کیلوگرم اوره + ۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار، ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار و ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل + سه تن زغال‌زیستی گندم و یا پنبه در هکتار بودند. در شرایط قطع آبیاری مصرف ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل + سه تن زغال زیستی گندم در هکتار به‌ترتیب میزان کلروفیل a و کل را ۵۵ و ۴۰ درصد، نسبت به شاهد افزایش دادند. بالاترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز و پراکسیداز در تیمار قطع آبیاری در گل‌دهی به‌دست آمد. همچنین، در شرایط تنش آبی کاربرد ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل + سه تن زغال زیستی پنبه، سبب افزایش محتوای نسبی آب برگ، عملکرد زیست‌توده و دانه به‌ترتیب به‌میزان ۵۳/۰۳، ۲۲/۰۵ و ۳۴/۷ درصد گردید. به‌طور کلی، کاربرد ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل + سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار، در شرایط تنش آبی باعث بهبود محتوای نسبی آب برگ، تعداد دانه در طبق، تعداد طبق بارور در بوته و در نهایت، عملکرد دانه گلرنگ شد.

واژه‌های کلیدی: پراکسیداز، تعداد دانه در طبق، قطع آبیاری، کاتالاز، کلروفیل

مقدمه

علی‌رغم مشکلات موجود در صنعت روغن‌های نباتی در داخل کشور و اینکه بیش از ۹۳ درصد از نیاز مصرفی به روغن به شکل روغن خام و دانه‌های روغنی توسط واردات تأمین می‌گردد، ضروری است تلاش‌های فراوانی جهت افزایش عملکرد دانه‌های روغنی به‌ویژه در شرایط تنش آبی صورت گیرد (Asghari et al., 2016). گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) یکی از قدیمی‌ترین گیاهان زراعی است که با هدف تولید روغن کشت می‌شود و به‌دلیل داشتن سیستم ریشه‌ای متراکم و عمیق و خاصیت خشکی‌پسندی، کارایی بالایی در استفاده از رطوبت خاک دارد(Das et al., 2017). علاوه‌بر تولید دانه با هدف استخراج روغن خوراکی، در برخی کشورها از جمله هند و چین این گیاه به‌خاطر گل‌های آن در طعم و رنگ دادن به غذاها و تهیه رنگ پارچه کاربرد دارد و همچنین، به‌دلیل کاربردهای دارویی مختلف کشت می‌گردد(Asqarpanh et al., 201).

تنش آبی در بین تنش‌های غیرزنده، از لحاظ طول دوره، شدت،

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشیار واستادیار، بخش اگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، ایران.
۴- دانشیار بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، ایران.
(*- نویسنده مسئول:
(Email: bijanzd@shirazu.ac.ir
https://doi.org/10.22067/agry.2023.79904.1134

وقوع و زمان آن غیرقابل پیش‌بینی است و با محدود کردن تولید محصول در ۲۵ درصد از زمین‌های کشاورزی جهان، شایع ترین تنش غیرزیستی در گیاه بوده و عامل اصلی کاهش عملکرد در گیاهان زراعی می‌باشد (Chang et al., 2013). مطالعات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد، گیاه گلرنگ در مراحل مختلف رشد مانند مرحله جوانه‌زنی، رویشی، گل‌دهی و پر شدن دانه به تنش آبی حساس است و تنش آبی بر خصوصیات مورفولوژیک و فیزیولوژیک گلرنگ تأثیر منفی گذاشته و عملکرد روغن و دانه را به‌طور معنی‌داری کاهش می‌دهد (Hussain et al ., 2016). تنش آبی موجب کاهش معنی‌داری در تعداد طبق در بوته، تعداد دانه در طبق، ارتفاع بوته، وزن هزار دانه، درصد روغن و عملکرد دانه خواهد شد (Kafi et al., 2007) و با توجه به اینکه عملکرد دانه نیز تحت تأثیر این اجزا می‌باشد، در نتیجه کاهش در اجزای عملکرد موجب پایین آمدن عملکرد دانه و به دنبال آن کاهش عملکرد در واحد سطح می‌شود (Noroozi et al., 2012).

تکنولوژی کربونیزاسیون در سال‌های گذشته به‌عنوان یک روش کارآمد برای کاهش گازهای گلخانه‌ای و ترسیب کربن اتمسفر به‌شمار می‌رود. کربونیزاسیون زیست‌توده براساس میزان و مدت زمان حرارت‌دهی شامل مراحل متفاوتی می‌باشد که روش گرماکافت آهسته، معمول‌ترین روشی است که در دنیا در حال گسترش می‌باشد (Manya, 2012; Berek et al., 2011). در طی روش گرماکافت، مواد آلی در شرایط اکسیژن محدود و یا بدون اکسیژن، در دمای بیش از ۴۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده شده و به ماده جامد سیاه رنگ غنی از کربن به‌نام زغال زیستی (بیوچار) تبدیل می‌شود. به‌طور تقریبی کلیه ترکیب‌ها و پس‌ماندهای آلی از جمله شاخ و برگ درختان، بقایای گیاهان زراعی (کاه و کلش، بقایای بادام زمینی (*Arachis hypogaea*)، پوشال برنج (*Oryza sativa*) وغیره)، مواد چوبی، انواع کودهای آلی (مرغی، دامی و غیره)، اجساد و لاشه حیوانات، لجن فاضلاب و پس‌ماندهای آلی صنعتی و شهری قابلیت تبدیل شدن به زغال زیستی را دارند (Sohi et al., 2010; Lehmann et al., 2011). تبدیل زیست‌توده به زغال‌زیستی و افزودن آن به خاک‌های کشاورزی می‌تواند از طریق تثبیت کربن باروری خاک را بهبود دهد. گزارش شده است که با مصرف زغال-زیستی به علت افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، افزایش درصد اشباع بازی خاک، و افزایش آب قابل دسترس گیاه، عملکرد ذرت از ۱۷ به ۲۱ تن در هکتار افزایش یافت (Cornelissen et al., 2013). کاربرد هم‌زمان زغال زیستی و کودهای شیمیایی می‌تواند کارایی مصرف آن ها را افزایش دهد (Sohi et al., 2010). در پژوهشی پنگ و همکاران (Peng et al., 2021) نشان دادند که کاربرد هم‌زمان کودهای نیتروژن، فسفر و پتاسیم با زغال زیستی با مقادیر ۱/۵، ۳ و ۶ تن در هکتار کارایی مصرف نیتروژن و عملکرد ذرت را افزایش و هدرروی نیتروژن را کاهش داد.

به‌دلیل مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی آسیب‌های مستقیم و غیرمستقیمی به گیاهان، حیوانات و ریزجانداران وارد شده است. همچنین، با توجه به اینکه ایران جزو مناطق خشک و نیمه خشک جهان بوده و شهرستان داراب دارای آب‌وهوای نیمه گرمسیری (با میانگین بارندگی ۲۵۰ میلی‌متر در سال) می‌باشد، بنابراین جهت افزایش میزان بهره‌برداری از امکانات محیطی به‌منظور بالابردن میزان عملکرد محصولات زراعی، توجه به استفاده بهینه از زیست‌توده مواد آلی به‌ویژه بقایا و پس‌ماندهای کشاورزی و تبدیل آن به زغال-زیستی و افزودن آن به خاک، ضروری می‌باشد. این پژوهش با هدف ارزیابی و مصرف زغال‌زیستی تولید شده از بقایای پنبه و گندم در مناطق گرم و نیمه‌خشک جنوب استان فارس (داراب) با توجه به کمبود آب آخر فصل رشد و تأثیر این دو عامل بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیمی، اجزای عملکرد و عملکرد گلرنگ در شرایط تنش آبی اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر تنش آبی و مصرف زغال زیستی بر میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیمی، اجزای عملکرد و عملکرد گلرنگ، آزمایشی به‌صورت اسپلیت در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، واقع در هفت کیلومتری شهرستان داراب با طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۶ دقیقه و عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۴۵ دقیقه و ارتفاع ۱۱۰۹ متر از سطح دریا و در سال زراعی۹۹- ۱۳۹۸ اجرا شد. در شروع پژوهش و پیش از کاشت، جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، از خاک محل آزمایش در دو عمق ۰ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری صورت گرفت (جدول ۱).

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش
Table l- Physical and chemical properties of the experimental soil

عمق Depth (cm)	شن Sand (%)	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	قابلیت هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)	فسفر P ($mg\ kg^{-1}$)
0-15	38.96	19.4	41.64	0.336	22
15-30	40.96	17.4	41.64	0.739	26
عمق Depth (cm)	پتاسیم K ($mg.kg^{-1}$)	آهن Fe ($mg\ kg^{-1}$)	مس Cu ($mg.kg^{-1}$)	روی Zn ($mg.kg^{-1}$)	منگنز Mn ($mg.kg^{-1}$)
0–15	165.04	0.67	3.05	1.01	7.48
15–30	156.69	1.23	0.46	0.53	0.64

نمونه خاک پس از انتقال به آزمایشگاه هواخشک شد و پس از عبور از الک دو میلی‌متری، ویژگی‌های مختلف خاک شامل قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (EC) (Rhoades, 1996)، فسفر به‌روش بی‌کربنات سدیم (Olsen, 1954)، پتاسیم با عصاره‌گیر استات آمونیوم یک میلی‌مولار خنثی (Helmke et al., 1996)، منگنز، آهن، روی و مس قابل استفاده با عصاره‌گیری خاک به‌وسیله دی تی پی ای (Lindsay & Norvell, 1978)، و درصد رس، سیلت و شن (بافت خاک) به‌روش هیدرومتر (Gee & Or, 2002) اندازه‌گیری شدند. پس از عملیات تهیه بستر کاشت، اقدام به کرت بندی در ابعاد (۳ × ۲ مترمربع) شد. فاکتورهای مطالعاتی شامل رژیم آبیاری به‌عنوان فاکتور اصلی در دو سطح آبیاری مطلوب و قطع آبیاری پس از مرحله گل‌دهی (مرحله ۶۵ مطابق با کدبندی فلمر) (Flemmer et al., 2015) و فاکتور فرعی تیمار کودی شامل شاهد بدون کود، مصرف سه تن زغال‌زیستی بقایای گندم در هکتار، مصرف سه تن زغال‌زیستی بقایای پنبه در هکتار، مصرف ۱۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار + ۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار، مصرف ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار، مصرف ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل در هکتار + سه تن زغال‌زیستی گندم در هکتار، مصرف ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار + سه تن زغال‌زیستی پنبه در هکتار بودند. در این آزمایش، بذر گلرنگ رقم گلدشت پاکوتاه، زودرس، بدون خار، رنگ گل قرمز، مقاوم به خوابیدگی و ریزش، قابل کشت در مناطق گرم، معتدل و سرد (Bahadori et al., 2019) در ابتدای آذرماه کشت شد. بذرها در ردیف‌هایی به‌فاصله ۵۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف پنج سانتی‌متر با عمق دو سانتی‌متر کشت گردید. فاصله بین تکرارها ۱/۵ متر و فاصله بین کرت‌ها یک متر در نظر گرفته شد. برای کنترل علف‌های هرز در طول فصل رشد، عملیات وجین دستی انجام گرفت. کاشت به روش خشکه‌کاری و با دست انجام گرفت. لازم به ذکر است که مصرف سه تن زغال‌زیستی گندم یا پنبه در هکتار برای هر کرت شش مترمربعی، ۱/۸ کیلوگرم بوده و میزان مصرف اوره برای تیمار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار برای هر کرت شش مترمربعی،۹۰ گرم در هر کرت (در سه مرحله شش برگی، هشت برگی و غنچه‌دهی) بود که در هر مرحله ۳۰ گرم استفاده شد و ۱۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار معادل ۷۵ کیلوگرم نیتروژن در نظر گرفته شد. در ضمن، میزان مصرف اوره برای ۱۱۲/۵ کیلوگرم در هکتار برای کرت شش مترمربعی،۶۷ گرم در هر کرت (در سه مرحله شش برگی، هشت برگی و غنچه‌دهی) و در هر مرحله ۲۲/۳ گرم بوده که ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره معادل ۵۶ کیلوگرم نیتروژن می‌باشد. همچنین در تیمار مصرف ۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل در هکتار برای هر کرت شش مترمربعی، ۳۰ گرم در هر کرت (قبل از کاشت) در نظر گرفته شد. مصرف ۳۷/۵ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل در هکتار برای کرت شش مترمربعی، ۲۲/۵ گرم در هر کرت (قبل از کاشت) می‌باشد. محاسبه میزان آب مورد نیاز برای هر کرت براساس ظرفیت زراعی خاک مزرعه (۲۴/۵ درصد وزنی) در نظر گرفته شد. در این روش، ابتدا قطعه زمینی به مساحت دو مترمربع مشخص و به‌شکل حوضچه درآمد و روی آن با پلاستیک پوشانده شد و سپس، به‌طور سنگین آبیاری گردید. بعد از قطع آبیاری و فروکش کردن آب، هر ۱۲ ساعت یک بار از عمق صفر تا یک متری توسعه ریشه نمونه‌برداری انجام شد و میزان رطوبت آن به‌روش وزنی اندازه‌گیری گردید. این کار تا زمانی ادامه داده شد، تا سرانجام میزان رطوبت در دو اندازه‌گیری پشت سر هم تقریباً با هم برابر شدند که براساس معادله زیر این میزان رطوبت برابر با رطوبت ظرفیت زراعی

می‌باشد (Daneshmand et al., 2006).

معادله (۱)

۱۰۰×[وزن خاک خشک / (وزن خاک خشک – وزن خاک تر)]= مقدار رطوبت

نیاز آبی گلرنگ به‌صورت روزانه با استفاده از میانگین روزانه داده‌های هواشناسی ایستگاه هواشناسی حسن آباد داراب (جدول ۲) محاسبه شد. در مجموع، مقدار آب مصرفی برای تیمار آبیاری مطلوب با ۱۰ دور آبیاری معادل ۴۹۹۳ مترمکعب در هکتار و برای تیمار قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی با هفت دور آبیاری معادل ۳۴۹۵ متر مکعب در هکتار بود. برای رسیدن به ۴۰ بوته در مترمربع در مرحله چهار برگی، بوته‌های اضافی حذف شدند. در زمان رسیدگی فیزیولوژیکی، برای اندازه‌گیری عملکرد دانه پس از حذف اثر حاشیه، یک مترمربع از بوته‌ها در هر کرت آزمایشی، از نزدیکی سطح خاک بریده شد و در آون در دمای ۷۲ درجه به‌مدت ۴۸ ساعت قرار گرفت. سپس عملکرد و اجزای عملکرد (تعداد طبق در بوته، تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه) محاسبه گردید. زغال زیستی مورد استفاده حاصل دو نوع بقایای گیاهی مختلف شامل بقایای گندم و پنبه بود که از طریق روش گرماکافت آهسته در شرایط اکسیژن محدود تهیه شد (Mendez et al., 2012). روش کار به این صورت بود که بقایای گندم و پنبه به صورت جداگانه در کوره در شرایط اکسیژن محدود در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده و نمونه‌ها به‌مدت سه ساعت در این دما نگهداری شدند. پس از آن، زغال‌های زیستی تولیدی به‌تدریج سرد شدند (Melo et al., 2013). و سپس آسیاب و از الک ۰/۵ میلی‌متری عبور داده شدند. برخی از ویژگی‌های شیمیایی زغال‌های زیستی در جدول ۳ آورده شده است. جهت تعیین غلظت کل عناصر فسفر، پتاسیم، مس، روی، آهن و منگنز، مقدار یک گرم از زغال زیستی پودر شده در کوره در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس خاکستر گردید و سپس، در اسید کلریدریک دو نرمال حل گردید و غلظت عناصر مورد نظر در عصاره به‌دست آمده اندازه‌گیری گردید (Ding et al., 2015). در عصاره حاصل، غلظت فسفر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر، غلظت پتاسیم توسط روش شعله‌سنجی توسط دستگاه فلیم فتومتر (Corning 510 ،UK) و غلظت عناصر کم مصرف توسط دستگاه جذب اتمی (AAS :PG 990 ،PG Instruments. UK) تعیین گردید. پ‌هاش توسط روش سان و همکاران (Sun et al., 2014) با استفاده از سوسپانسیون ۲۰:۱ کودآلی به آب مقطر، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۱۰:۱ کودآلی به آب مقطر (Yang et al., 2016) اندازه‌گیری شد.

جدول ۲- داده‌های هواشناسی شهرستان داراب در سال زراعی ۱۳۹۸- ۱۳۹۹

Table2. Metrological data in Darab city in cropping year 2019-2020

شاخص اقلیمی Climatic index / ماه Month	مهر September	آبان October	آذر November	دی December	بهمن January	اسفند February	فروردین March	اردیبهشت April	خرداد May
میانگین کمینه دما Average minimum temperature	18.4	10.8	6.3	3.9	3.8	7.9	10.8	15.8	21.3
میانگین بیشینه دما Average maximum temperature	35.4	26.2	19.8	17.6	18.3	23.1	23.6	31.9	40.5
متوسط دما Average temperature	26.9	18.5	13	10.7	11	15.5	17.2	23.9	30.9
بارندگی Rainfall	0.2	26.1	117.3	122.8	24.6	9.4	158.7	0.0	2.6

سنجش رنگیزه‌های فتوسنتزی: برای اندازه‌گیری رنگیزه‌های فتوسنتزی، ۱۰ روز پس از تنش در مرحله گل‌دهی از پنج برگ جوان نزدیک به بالاترین غنچه در هر تیمار نمونه‌گیری انجام شد. استخراج و اندازه‌گیری محتوای کلروفیل a و b و کاروتنوئید طبق روش آرنون (Arnon, (1967 انجام شد. که در این روش، ۰/۵ گرم از نمونه تر برگ و ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد که به‌تدریج اضافه

می‌شد، در داخل یک هاون چینی به‌خوبی ساییده شدند. پس از آن عصاره به‌مدت ۱۵ دقیقه با دور ۶۰۰۰ در دقیقه در سانترفیوژ رسوب داده شد. بعد از آن، سه میلی‌لیتر از محلول شفاف رویی را با هفت میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد به حجم ۱۰ میلی‌لیتر رسانده و در طول‌موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر ساخت کشور ژاپن شرکت شیمادزو مدل (UV-160A)، میزان جذب عصاره استخراج شده قرائت گردید.

در پایان، جهت محاسبه میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی از معادله‌های زیر استفاده شد.

معادله (۲)

$$\text{Chlorophyll a} = (19.3 \times A\,663 - 0.86 \times A\,645)V / 100W$$

معادله (۳)

$$\text{Chlorophyll b} = (19.3 \times A\,645 - 3.6 \times A663)\ V / 100W$$

معادله (۴)

$$\text{Carotenoid} = (100 \times A470) - (3.27 \times \text{mg chl. a}) - (104 \times \text{mg chl. b}) / 227$$

که در این معادله‌ها، A: جذب نور در هر طول موج، W: وزن‌تر نمونه برحسب گرم و V: حجم محلول صاف شده می‌باشد.

جدول ۳- برخی از ویژگی‌های شیمیایی زغال زیستی بقایای پنبه و گندم

Table 3- Some chemical characteristics of cotton and wheat residues biochar

خصوصیت Property	زغال زیستی پنبه Cotton biochar	زغال زیستی گندم Wheat biochar
قابلیت هدایت الکتریکی Ec ($dS.m^{-1}$)	3.52	7.64
پ‌هاش pH	10.10	10.58
فسفر کل Total P (%)	0.18	0.07
پتاسیم کل Total K (%)	0.74	0.63
روی کل Total Zn ($mg.kg^{-1}$)	27.1	18.12
مس کل Total Cu ($mg.kg^{-1}$)	10.3	5.35
منگنز کل Total Mn ($mg.kg^{-1}$)	241	49.5
آهن کل Total Fe ($mg.kg^{-1}$)	361	183

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز: برای سنجش آنزیم‌های آنتی اکسیدانی ۱۰ روز پس از تنش در مرحله گل‌دهی از پنج برگ جوان نزدیک به بالاترین غنچه در هر تیمار نمونه‌گیری انجام شد که با استفاده از روش ابیی (Aebi, 1984) فعالیت آنزیم کاتالاز تعیین گردید. در این روش، در یک کیووت کوارتز سه میلی‌لیتری مخلوط سه محلول (۲/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار با ۷ =pH، با ۰/۲ میکرولیتر عصاره آنزیمی و ۰/۳ میلی‌لیتر آب اکسیژنه) ریخته شد و با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل (UV-160A) در طول موج ۲۴۰ نانومتر فعالیت آنزیم کاتالاز در مدت زمان واکنش ۳۰ ثانیه بر حسب واحد بر دقیقه بر گرم وزن تر قرائت گردید و میزان آن از معادله زیر به‌دست آمد.

معادله (۵)

$$\text{Catalase activity} = (\Delta \times v) / (€ \times vs \times FW)$$

که در آن، FW: وزن تر نمونه برگ برداشت شده بر حسب (گرم)، Δ: تفاوت دو جذب در دقیقه (ابتدا جذب اول و پس از ۳۰ ثانیه جذب دوم خوانده می‌شود)، €: ضریب خاموشی ($€=39.4\ mM^{-1}.cm^{-1}$)، vs: حجم نمونه برداشت شده برحسب (میلی‌لیتر) و v: حجم کل عصاره برگ (میلی‌لیتر) می‌باشد.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پراکسیداز: برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پراکسیداز، مخلوط واکنشی از (دو میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم با pH=۷ و ۰/۲ میلی‌لیتر گایاکول ۱۰ میلی‌مولار همراه با ۰/۳

میلی‌لیتر آب اکسیژنه پنج میلی‌مولار) استفاده گردید. در این روش، در یک کیووت شیشه‌ای سه میلی‌لیتری بـه مخلـوط واکـنش فـوق ۰/۲ میکرولیتر از عصاره آنزیمی اضافه شد و در طول مـوج ۴۷۰ نـانومتر و قرار دادن در دستگاه اسپکتروفتومتر در مدت زمان واکـنش ۶۰ ثانیـه فعالیت آنزیم پراکسیداز انـدازه‌گیـری و ثبـت شـد (Aebi, 1984). در پایان، از معادله زیر میزان آن محاسبه گردید.

معادله (۵)

Peroxidase activity= (Δ×v) / (€×vs×FW)

که در آن، Δ: نشان‌دهنده تفاوت دو جذب در دقیقه (ابتـدا جـذب اول و پس از ۶۰ ثانیه جذب دوم را خوانده می‌شود)، vs: حجم نمونه برداشت شده (میلی‌لیتر)، v: حجم کل عصاره برگ (میلی‌لیتـر)، FW: وزن تـر نمونـه بـرگ برداشـت شـده (گـرم) و €: ضـریب خاموشـی ($€=26.6\ mM^{-1}\ cm^{-1}$) می‌باشد.

اندازه‌گیری محتـوای نسـبی آب بـرگ (RWC)**:** جهـت اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ ۱۰ روز پـس از تـنش در مرحلـه گل‌دهی از پنج برگ جوان نزدیک به بالاترین غنچه در هر تیمـار بـه صورت تصادفی نمونه‌گیری انجام شد و برگ‌ها در کیسـه پلاسـتیکی قـرار داده شدند و بلافاصـله جهت تعیین رطوبت به آزمایشگاه انتقـال یافت. در آنجا، وزن تازه برگ‌ها مشخص شد و پـس از آن، در درجـه حرارت اتاق (۱۸– ۲۰ درجه سانتی‌گراد) و در تاریکی به‌مدت ۱۸– ۱۶ ساعت در آب مقطر غوطه‌ور شدند و به دنبال آن، وزن آماس پـس از حذف رطوبت سطح نمونه‌ها با قرار دادن آن‌ها در بـین کاغـذ خشـک کن، تعیین گردید. وزن خشـک نیـز پـس از قـرار گــرفتن نمونـه‌هـا به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد تعیـین و در نهایـت، محتوای نسبی آب از معادله زیر محاسبه شد (Barrsu et al., 2015).

RWC= (FW – DW) / (TW – DW) × 100 معادله (۷)

که در آن، RWC: محتـوای نسـبی آب بـرگ، FW: وزن تـازه، TW:وزن آماس و DW: وزن خشک می‌باشد.

تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده پس از جمع‌آوری داده‌هـا، با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۲) انجام شـد و میانگین‌هـا بـا آزمون LSD در سطح احتمال یک درصد مورد مقایسه قرار گرفته و از نرم‌افزار اکسل (نسخه ۲۰۱۳) نیز برای ترسیم شکل‌ها استفاده گردید.

نتایج و بحث

محتوای کلروفیل a و b و کل

نتایج جدول تجزیه واریـانس نشـان داد کـه اثـرات اصـلی رژیـم آبیاری و تیمار کودی بر محتوای کلروفیل a و کل در سـطح احتمـال پنج درصد معنی‌دار شد، ولی بـر محتـوای کلروفیـل b معنـی‌دار نبـود (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین اثر رژیم آبیاری بر کلروفیـل نشـان داد که در شرایط قطع آبیاری، کلروفیل a و همچنـین کلروفیـل کـل کاهش یافت (جدول ۵). بیشترین میزان کلروفیل a مربـوط بـه تیمـار ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار همراه با سه تن زغال زیستی گندم یا پنبه در هکتار به‌ترتیب با میانگین ۱/۵۵ و ۱/۵۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر به‌دست آمـد (جـدول ۵). این چـنین رونـدی در مـورد کلروفیـل کـل نیـز مشـاهده شـد و تیمارهای تلفیقی دارای بیشترین میزان کلروفیل کل بودند. در نهایت، کمترین مقدار کلروفیل a و کل در شاهد بـدون کـود (عـدم مصـرف زغال زیستی) به‌ترتیب به‌میزان ۱/۰۵ و ۱/۵۸ میلی‌گرم بـر گـرم وزن تر به‌دست آمد. براساس پژوهشی، کاربرد زغال زیستی باعث بالارفتن میزان کلروفیل می‌گردد که این امر موجب بهبود مـواد هیـدروکربنی، فتوسنتز و تولید زیست‌توده بیشتر و در نهایت، موجب افزایش ارتفاع و سطح برگ می‌گردد (Song et al., 2012). براساس گزارش محققان، با کاربرد دو نوع زغال زیستی به‌دست آمده از بقایای سـبوس بـرنج و آفتابگردان تهیه شده در دماهای مختلف و در سـه سـطح (۱، ۵ و ۱۰ تن در هکتار) در یک آزمایش مزرعه‌ای در کشـت ذرت (*Zea mays* L.)، کاربرد هر دو نوع زغال زیستی باعث افزایش معنـی‌دار کلروفیـل برگ ذرت نسبت به تیمار عدم کاربرد زغال زیستی شـد (Adejumo et al., 2016). در برخی پژوهش‌ها، جهـت ارزیـابی میـزان فتوسـنتز گیاه، محتوای کلروفیل برگ اندازه‌گیری می‌شود کـه یکـی از عوامـل بسیار مهم در تولید ماده خشک گیاه به‌شمار می‌رود. بنابراین، کـاهش آن در شرایط رژیم آبیاری به‌عنوان یک عامل محدودکننـده غیرروزنـه ای در فتوسـنتز محسـوب می‌شـود (Amiri et al., 2016; Ghosh et al., 2004). زمانی که گیاهان با تـنش آبـی مواجـه می‌شـوند، بـا بستن روزنه‌ها و کاهش تعرق، آب برگ را حفظ می‌کنند و میـزان دی اکسیدکربن در بافـت مزوفیلـی گیـاه را کـاهش داده و ایـن شـرایط، واکنش‌هـای تـاریکی فتوسـنتز شـده را مختـل می‌کننـد، در نتیجـه محصـولات حاصـل از واکـنش‌هـای روشـنایی مصـرف نمی‌شـوند و مولکول اکسیژن به‌عنوان پذیرنده جانشین الکترون در مسیر زنجیـره انتقال الکترون عمل می‌کند و باعث شـکل‌گیـری رادیکـال‌هـای آزاد

اکسیژن می‌شود که در نتیجه، با کـاهش بیوسـنتز و افـزایش تجزیـه کلروفیل، مقدار کلروفیل کاهش می‌یابد (Santosa, 2004). همچنین، کاهش مقدار کلروفیل‌ها در شرایط تنش آبی در گنـدم گـزارش شـده است (Abdalla et al., 2007). در گیاه گلرنگ و گیاه لوبیا با افزایش شدت تنش آبی میزان کلروفیل به‌ترتیب ۶۹ و ۵۵ درصد کاهش یافت (Flexas et al., 2008). براسـاس مطالعـه حسـین‌زاده و همکـاران (Hosseinzadeh et al., 2016)، در شرایط تنش آبـی، محتـوای آب برگ‌ها وانتقال مواد معدنی در اثر تنش اکسیداتیو در سلول‌های برگی، کاهش یافته و رنگدانه‌ها تجزیه شدند کـه بـا نتـایج پـژوهش حاضر به‌ویژه در شاهد بدون کود مطابقت دارد. بـا توجـه بـه پـژوهش‌هـای بررسی شده، به نظر می‌رسد که کاربرد زغال زیستی با حفظ رطوبـت خاک و بهبود وضعیت آب و تغذیه‌ای گیـاه نقـش مهمـی در افـزایش رنگدانه‌های گلرنگ دارد.

محتوای کاروتنوئید

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد کـه اثـر رژیـم آبیـاری بـر محتوای کاروتنوئید در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شـد (جـدول ۴). به‌طور کلی، تنش آبی باعث افـزایش محتـوای کارتنوئیـد گردیـد، به‌گونه‌ای که بیشترین میزان کاروتنوئید از تیمار ۱۱۲/۵ کیلـوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپـل در هکتـار + سـه تـن زغال زیستی پنبه در هکتار در شرایط تنش آبی حاصل شد که نسـبت به شاهد بدون کود، ۶۴/۷ درصد افـزایش داشـت. در شـرایط آبیـاری مطلوب نیز بیشترین محتوای کاوتنوئید در تیمار تلفیقی پنبه مشـاهده شد که ۵۳/۸ درصد نسبت به شاهد بدون کود بیشتر بـود (جـدول ۶). بالا رفتن محتوای کاروتنوئید بر اثر رژیم آبیاری، ناشی از اثـر دفـاعی این رنگیزه‌ها می‌باشد. کاروتنوئیدها در سیسـتم دفـاع آنتـی‌اکسـیدانی برای محافظت از رنگدانه‌های فتوسنتزی کلروفیل، نقش بسیار مهمی بر عهده دارند و افزایش میزان آن‌ها در شرایط تنش آبی قابـل پـیش بینی است. افـزایش مقـدار کاروتنوئیـدها در شـرایط قطـع آبیـاری در گل‌دهی و افزایش آن در مرحله پر شدن دانه، نشان‌دهنده نقش مهـم آن در تعـــدیل میـــزان رادیکـــال‌هـــای فعـــال اکســـیژن می‌باشـــد (Navabpour et al., 2015). در واقع، افزایش کارتنوئیدها با افزایش شدت تنش آبی بیانگر نقش کلیدی و حفاظتی آن‌ها در شـرایط تـنش می‌باشد و با پیشرفت تـنش آبـی بـه دلایلـی ماننـد پیـری زودرس و تخریب آن‌ها توسط عوامل مخـرب (از جملـه اکسـیژن فعـال) باعـث می‌شود که سـرعت افـزایش آن‌هـا کـاهش یابـد (Chalker-Scott, 2002). مطابق با پژوهش حاضر، افزایش محتوای کاروتنوئیـد جهـت مقابله با تنش آبی درگیاه گلرنگ توسط آزاد بخت و همکاران (Azad akht et al., 2017) و در گیـاه گنـدم (*Triticum aestivum* L.) توسط عبـدالله و همکـاران (Abdollah et al., 2007) گـزارش شـده است که نشان‌دهنده فعال شـدن مکانیسـم دفـاعی گیـاه گلرنـک در مواجهه با تنش آبی می‌باشد.

محتوای نسبی آب برگ (RWC)

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به محتوای نسبی آب برگ نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر متقابل رژیم آبیاری در تیمـار کـودی در سطح احتمال یک درصد بود. (جدول ۴). بیشترین محتـوای نسـبی آب برگ مربوط به کاربرد تیمـار ۱۱۲/۵ کیلـوگرم اوره در هکتـار + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار + سه تن زغال زیستی پنبـه در هکتار در شرایط آبیاری مطلوب بـا میـانگین ۶۴/۱۷ درصـد بـود کـه نسبت به شاهد بدون کود در آبیاری مطلوب بـا میـانگین ۳۹/۹۵، بـه میزان ۲۴/۲۲ درصد افزایش نشان داد (شکل ۱). همچنین، بیشـترین محتوای نسبی آب برگ در شرایط قطع آبیاری در گل‌دهی مربوط بـه تیمار ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتـار + ۳۷/۵ کیلـوگرم سوپرفسـفات تریپل در هکتار + سه تن زغال زیسـتی پنبـه در هکتـار بـا میـانگین ۵۶/۷۰ درصد می‌باشد که نسبت به شاهد بدون کود در همین شـرایط با میانگین ۳۷/۰۵، ۱۹/۶۵ درصد افزایش نشان می‌دهد (شکل ۱). در واقع، زغال زیستی به‌کار رفته در این تیمـار توانسـته اسـت، محتـوای نسبی آب برگ را با حفظ رطوبت خاک افزایش دهد. زغال زیسـتی از روش‌های مختلفی مانند نگهداری آب و مواد غذایی، افزایش ظرفیـت تبادل کاتیونی (Glaser et al., 2002)، بهبود ویژگی‌های کیفی خاک (Sohi, 2012)، کاهش تصعید گازهای گلخانـه‌ای و افـزایش میـزان ترسـیب کـربن در خـاک (Chan et al., 2008)، تحریـک فعالیـت ریزجانداران خاک (Lehmann et al., 2011) و بهبود کارآیی مصرف عناصـر غـذایی، سـبب افـزایش رشـد و عملکـرد گیاهـان می‌شـود (Ippolito et al., 2012). کاهش محتـوای نسـبی آب فعالیـت‌هـای حیاتی گیاه را مختل کرده و مانع تقسـیم سـلولی، فتوسـنتز خـالص و سنتز پـروتئین، کـاهش رشـد انـدام‌هـای گیـاهی و تغییـر در تعـادل هورمـونی بافـت‌هـای اساسـی گیـاه می‌گـردد (Lin et al., 2006). محققان در کلزا (*Brassica napus*) در شـرایط تـنش آبـی کـاهش

محتوای نسبی آب برگ را گزارش کردند (Arvin et al., 2017). در واقع، با افزایش شدت تنش آبی، پتانسیل آب برگ، رطوبت خاک، محتوای نسبی آب برگ پایین آمده و به دنبال آن هدایت روزنه‌ای و در نتیجه، ورود دی اکسید کربن به داخل برگ کاهش می‌یابد. کاهش هدایت روزنه‌ای ناشی از تغییر محتوای نسبی آب نشان‌دهنده این است که احتمالاً علائم ارسالی از ریشه در شرایط تنش آبی باعث بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز می‌شود (Zhou et al., 2017). در پژوهش حاضر به نظر می‌رسد که استفاده از زغال زیستی به‌کار رفته در تیمار تلفیقی کود شیمیایی با زغال زیستی پنبه، موجب بهبود و افزایش محتوای نسبی آب برگ به‌دلیل حفظ رطوبت خاک شده است.

فعالیت آنزیم کاتالاز

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به فعالیت آنزیم کاتالاز نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر متقابل رژیم آبیاری در تیمار کودی در سطح احتمال یک درصد بود (جدول ۴). بیشترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز با میانگین ۲/۸۸ واحد بر دقیقه بر گرم وزن تر مربوط به تیمار قطع آبیاری در گل‌دهی در شاهد بدون کود بود که نسبت به شاهد بدون کود در آبیاری مطلوب ۴۸/۴۵ درصد افزایش داشت (جدول ۶). در واقع، در شرایط تنش آبی فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز افزایش می‌یابد که باعث بالا رفتن پتانسیل دفاعی گیاه در مقابل با کمبود آب می‌شود و میزان تحمل گیاه را به تنش آبی بهبود می‌بخشد. رادیکال‌های آزاد اکسیژن پس از قطع آبیاری افزایش یافته و موجب تخریب سیستم فتوسنتزی، غشای سلولی و اکسیداسیون بسیاری از ترکیبات حیاتی گیاهان می‌شوند (Borislev et al., 2016; Rahbarian et al., 2012). آنزیم‌هایی مانند سوپراکسیددیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز اولین سد دفاعی در مقابله با افزایش رادیکال‌های آزاد اکسیژن در سلول‌های گیاهان می‌باشند. در نتیجه، افزایش فعالیت این آنزیم‌ها در جهت کاهش اثر منفی رادیکال‌های آزاد اکسیژن تحت تنش آبی در گیاه ضروری به نظر می‌رسد (Gunes et al., 2006). روزنه‌ها در شرایط قطع آبیاری بسته می‌شوند و باعث افزایش دمای برگ‌ها شده و به تبع آن، رادیکال‌های آزاد اکسیژن تشکیل و موجب پراکسیداسیون پروتئین‌ها و لیپیدها می‌شود. آنزیم‌هایی نظیر کاتالاز و پراکسیداز در این شرایط، به‌عنوان آنزیم‌های اکسیداتیو فعال‌تر می‌شوند (Sirous Mehr et al., 2014). محققان در مطالعه‌ای روی گلرنگ نشان دادند که میزان کاتالاز در تنش آبی ملایم و شدید نسبت به شرایط آبیاری مطلوب بین ۴۴ تا ۶۳ درصد افزایش یافتند (Rahbarian et al., 2012; Taheri et al., 2017). در واقع، در پژوهش حاضر در زمان تنش در مرحله گل‌دهی، میزان آنزیم کاتالاز افزایش یافته تا از گیاه در مقابل اثرات مخرب تنش آبی محافظت کند و بین تیمارهای به‌کار رفته، در شاهد بدون کود، به‌دلیل عدم مصرف زغال‌های زیستی یا کودهای شیمیایی تنش کمبود مواد غذایی نیز بر گیاه وارد شده که بیشترین افزایش میزان آنزیم کاتالاز را شاهد بودیم.

فعالیت آنزیم پراکسیداز

نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌های مربوط به فعالیت آنزیم پراکسیداز در جدول ۴ نشان داد که اثر متقابل رژیم آبیاری در تیمار کودی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. با قطع آبیاری در گل‌دهی فعالیت آنزیم پراکسیداز افزایش یافت. بیشترین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز مربوط به تیمار قطع آبیاری در گل‌دهی در شاهد بدون کود با میانگین ۲/۷۵ واحد بر دقیقه بر گرم وزن تر بود که نسبت به همین تیمار با میانگین ۱/۹۸ واحد بر دقیقه بر گرم وزن تر در شرایط آبیاری مطلوب ۳۸/۸۸ درصد افزایش داشت (جدول ۶). در شرایط تنش آبی، ظرفیت انتقال الکترون فتوسنتزی کاهش یافته و روزنه‌ها بسته و باعث تجمع الکترون‌ها و افزایش گونه‌های فعال اکسیژن مانند پراکسید هیدروژن شده که منجر به تخریب سیستم فتوسنتزی، غشای سلول و اکسیداسیون بسیاری از ترکیبات حیاتی گیاهان می‌شود (Taheri et al., 2017). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نظیر پراکسیداز، اولین سد دفاعی در مقابله با افزایش گونه‌های واکنش‌دهنده اکسیژن در سلول‌های گیاهان می‌باشد (Gunes et al., 2006). براساس مطالعه طاهری و همکاران (Taheri et al., 2017)، تنش آبی ملایم و شدید میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز را نسبت به شرایط آبیاری مطلوب به‌ترتیب ۱۰/۳۲ و ۳۳/۵ درصد افزایش داد، افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز در اثر تنش آبی در گلرنگ (Hassanpour Lescokelaye et al., 2013) نیز گزارش شده است. در پژوهش حاضر نیز آنزیم پراکسیداز نیز همچون آنزیم کاتالاز، در مواجهه با تنش آبی افزایش یافت و در شاهد بدون کود، به دلیل استفاده نکردن از تیمارهای کودی، میزان پراکسیداز کاهش یافت.

عملکرد زیست‌توده

نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌های مربوط به عملکرد زیست-توده نشان داد که اثر متقابل رژیم آبیاری در تیمار کودی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). عملکرد زیست‌توده در شرایط آبیاری مطلوب در تیمار ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل در هکتار + سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار با میانگین ۷۴۳۳ کیلوگرم در هکتار بیشترین میزان را نشان داد که نسبت به شاهد بدون کود در همین شرایط، ۲۷/۵ درصد افزایش داشت (شکل ۲). همچنین، بیشترین عملکرد زیست‌توده در شرایط تنش آبی در مرحله گل‌دهی مربوط به همین تیمار با میانگین ۶۵۴۲ کیلوگرم در هکتار بود که نسبت به شاهد بدون کود در همین شرایط، با میانگین ۵۳۶۰ کیلوگرم در هکتار، ۲۲/۰۵درصد افزایش عملکرد مشاهده شد. عملکرد زیست‌توده نشان‌دهنده ظرفیت گیاه در جذب نور و تبدیل انرژی نورانی به شیمیایی است، بنابراین، کاهش هدایت روزنه‌ای و فتوسنتز خالص و همچنین، مقدار کلروفیل کم‌تر در شرایط تنش آبی می‌تواند باعث کاهش عملکرد زیست‌توده شود (Liu et al., 2004). گزارش‌های مختلف، بیانگر بهبود عملکرد یا افزایش زیست‌توده گیاهی در نتیجه کاربرد زغال زیستی در مناطق حاره با خاک‌های اسیدی می‌باشد. در خاک‌های هوادیده مناطق حاره، کاهش اسیدیته خاک، دلیل اصلی تأثیر مثبت زغال زیستی بر گیاه است (Rajkovich et al., 2012). مطالعاتی در مورد اثرات زغال زیستی بر گیاه در مناطق غیرحاره مانند مناطق خشک و نیمه خشک با خاک غیراسیدی انجام شده است. به‌عنوان مثال، در اثر کاربرد ۱۰ تن در هکتار زغال زیستی در یک خاک آهکی، باعث افزایش تولید زیست‌توده سویا و کاهش تولید زیست‌توده گندم شد (Van Zwieten et al., 2010). محققان گزارش کردند که با استفاده از دو نوع زغال زیستی حاصل از شبدر سفید و کود مرغی در یک خاک لومی، عملکرد زیست‌توده دو گیاه ذرت و گندم و همچنین، وزن خشک ریشه در دو گیاه به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار عدم کاربرد زغال زیستی افزایش یافت (Abbasi et al., 2015). در پژوهش حاضر به نظر می‌رسد که استفاده از تیمار ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار + سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ، فتوسنتز خالص، کلروفیل بیشتر و در نهایت، عملکرد زیست‌توده بالاتر می‌گردد.

تعداد دانه در طبق

نتایج جدول تجزیه واریانس تعداد دانه در طبق در جدول ۴ نشان داد که اثر رژیم آبیاری در سطح یک درصد دارای اختلاف آماری معنی‌داری می‌باشد. در این مطالعه تیمار ۱۱۲/۵ اوره + ۳۷/۵ فسفات + سه تن زغال زیستی پنبه با میانگین ۱۵/۸۰ دانه با تیمار آبیاری مطلوب، بیشترین و شاهد بدون کود با میانگین۱۲/۵۰ دانه در تیمار تنش آبیاری در مرحله گل‌دهی کمترین میزان دانه در طبق را به خود اختصاص دادند (جدول ۶). در این مطالعه، استفاده از تیمار ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار + سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار در شرایط آبیاری مطلوب و تنش آبی، به‌ترتیب موجب افزایش ۱۲/۸۵و ۸/۸ درصدی تعداد دانه در طبق نسبت به شاهد بدون کود شده است. براساس گزارش محققان، بیشترین تعداد دانه در طبق از مصرف پنج تن در هکتار زغال زیستی به‌دست آمد (Sajedi et al., 2018). در پژوهش حاضر، افزایش تعداد دانه در طبق با مصرف تیمار تلفیقی کودشیمیایی با زغال زیستی پنبه به‌دلیل این است که در این تیمار زغال زیستی می‌تواند ضمن تأمین بخشی از عناصر مورد نیاز گیاه به‌خصوص پتاسیم، از هدررفت و آبشویی عناصر غذایی نیز جلوگیری کرده و ویژگی‌های فیزیکی خاک جهت بهبود رشد ریشه را نیز بهبود بخشد (Najafi-Ghiri et al., 2022b).

تعداد طبق بارور در بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار تیمار کودی در سطح احتمال پنج درصد بر تعداد طبق بارور در بوته می‌باشد (جدول ۴). بیشترین تعداد طبق تولید شده در گیاه مربوط به تیمار ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ سوپرفسفات تریپل در هکتار + سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار در شرایط آبیاری مطلوب به‌میزان ۱۰/۳۰ عدد ۱۹/۷۶ درصد افزایش نسبت به شاهد بدون کود در شرایط آبیاری مطلوب بود (جدول ۶).

جدول ٤- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات اندازه‌گیری شده گلرنگ در شرایط رژیم آبیاری و تیمار کودی

Table 4- Analysis of variance (mean square) of the measured traits of safflower under the irrigation regime and fertilizer treatment

درجه آزادی df	محتوای کلروفیل a Chlorophyll a content	محتوای کلروفیل b Chlorophyll b content	کلروفیل کل Total chlorophyll	محتوای کاروتنوئید Carotenoid content	کاتالاز Catalase	پراکسیداز Peroxidase	محتوای نسبی آب Relative water content	تعداد طبق بارور در بوته No.of fertile capitule per plant	تعداد دانه در طبق No.of seed in capitule	عملکرد زیست‌توده Biological yield	عملکرد دانه Seed yield
2	0.24^{ns}	0.08*	0.65**	0.06**	0.02^{ns}	0.09**	65.61**	1.31^{ns}	5.47**	1096.92^{ns}	5.21^{ns}
1	0.37*	0.06^{ns}	0.59*	0.06**	2.50**	4.83**	1034.060**	3.09*	43.20**	8502300.21**	844050.38**
2	0.26	0.019	0.38	0.02	0.001	0.007	0.66	1.44	0.41	3911.35	7.45
6	0.21*	0.02^{ns}	0.31*	0.005^{ns}	1.02**	0.39**	283.61**	3.32**	1.26*	691210.85**	106790.48**
6	0.03^{ns}	0.002^{ns}	0.03^{ns}	0.001*	0.34**	0.11**	34.71 **	0.44^{ns}	2.79*	206343.71**	13644.99**
24	0.07	0.017	0.09	0.008	0.008	0.005	9.38	0.69	0.89	3158.81	283.91
	21.20	23.49	16.28	15.55	4.99	3.66	6.40	8.91	6.78	0.87	1.09

	منابع تغییرات S.O.V	تکرار Replication(r)	رژیم آبیاری Irrigation regime (A)	خطای کرت اصلی Main plot error (Rep.×A)	تیمار کودی (B)	A×B	خطای کرت فرعی Subplot error (Rep.×B)	ضریب تغییرات CV(%)

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات ساده رژیم آبیاری و تیمار کودی روی کلروفیل a و کل گلرنگ

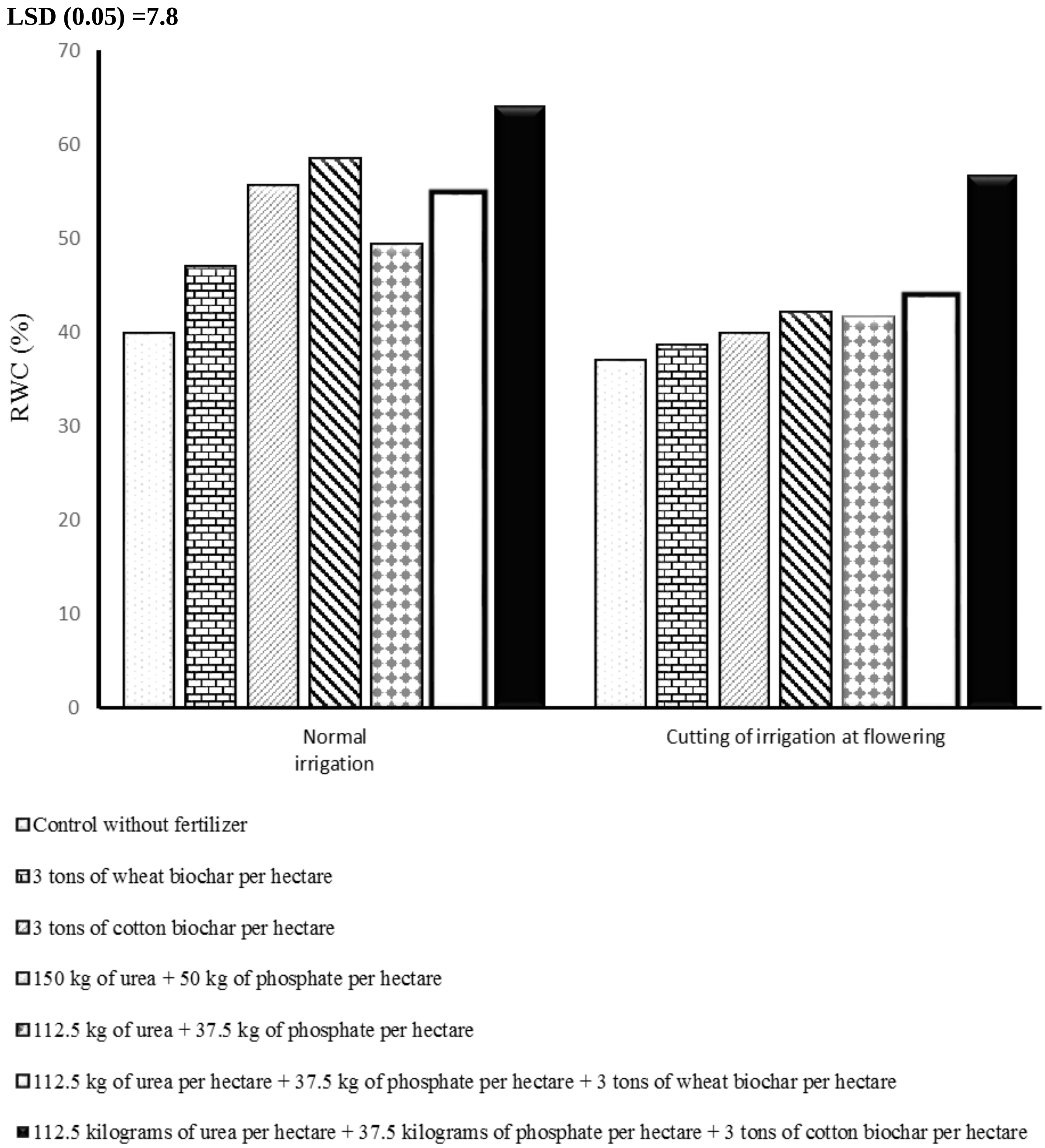
Table 5- The main effects of irrigation regime and fertilizer treatment on chlorophyll a and total of safflower

اثرات اصلی Main effects		محتوای کلروفیل a Chlorophyll a content (mg.g-1 Fw)	محتوای کلروفیل کل Total chlorophyll content (mg.g-1 Fw)
رژیم آبیاری Irrigation regime	آبیاری مطلوب Normal irrigation	1.38	1.97
	قطع آبیاری در گل‌دهی Cutting of irrigation at flowering	1.19	1.73
	LSD (0.05)	0.13	0.22
تیمار کودی Fertilizer treatment	سه تن زغال زیستی گندم در هکتار 3 tons of wheat biochar per hectare	1.23	1.83
	سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار 3 tons of cotton biochar per hectare	1.30	1.80
	۱۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار + ۵۰کیلوگرم سوپر فسفات تریپل در هکتار 150 kg of urea + 50 kg of phosphate per hectare	1.27	1.78
	۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل در هکتار 112.5 kg of urea + 37.5 kg of phosphate per hectare	1.11	1.68
	۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل در هکتار + سه تن زغال زیستی گندم در هکتار 112.5 kg of urea per hectare + 37.5 kg of phosphate per hectare + 3 tons of wheat biochar per hectare	1.55	2.26
	۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل در هکتار + سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار kilograms of urea per hectare + 37.5 kilograms of phosphate per hectare + 3 tons of cotton biochar per hectare	1.52	2.05
	LSD (0.05)	0.14	0.21

جدول ٦- مقایسه میانگین صفات گیاهی گلرنگ در شرایط رژیم آبیاری و تیمار کودی

Table 6- Comparison of average plant traits of safflower under irrigation regime and fertilizer treatment

رژیم آبیاری Irrigation regime	تیمار کودی Fertilizer treatment	محتوای کاروتنوئید Carotenoid content (mg.g-1Fw)	کاتالاز Catalase (U.min-1.g-1Fw)	پراکسیداز Peroxidase (U.min-1.g-1 Fw)	تعداد طبق بارور در بوته No. of capitule per plant	تعداد دانه در طبق No. of seed in capitule
آبیاری مطلوب Normal irrigation	شاهد بدون کود Control without fertilizer	0.13	1.94	1.98	8.60	14.0
	سه تن زغال زیستی گندم در هکتار 3 tons of wheat biochar per hectare	0.14	1.87	1.78	9.20	14.40
	سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار 3 tons of cotton biochar per hectare	0.20	1.92	1.89	9.30	15.0
	۱۵۰ کیلوگرم اوره + ۵۰ کیلوگرم فسفات در هکتار 150 kg of urea + 50 kg of phosphate per hectare	0.14	1.14	1.40	9.40	15.50
	۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره + ۳۷/۵ کیلوگرم فسفات در هکتار 112.5 kg of urea + 37.5 kg of phosphate per hectare	0.15	1.26	1.48	9.23	14.60
	۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم فسفات در هکتار + سه تن زغال زیستی گندم در هکتار 112.5 kg of urea per hectare + 37.5 kg of phosphate per hectare + 3 tons of wheat biochar per hectare	0.15	1.48	1.59	9.30	14.90
	۱۱۲ /۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم فسفات در هکتار + سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار 112.5 kilograms of urea per hectare + 37.5 kilograms of phosphate per hectare + 3 tons of cotton biochar per hectare	0.16	1.69	1.67	10.30	15.80
قطع آبیاری در گل‌دهی Cutting of irrigation at flowering	شاهد بدون کود Control without fertilizer	0.17	2.88	2.75	8.20	12.50
	سه تن زغال زیستی گندم در هکتار 3 tons of wheat biochar per hectare	0.24	2.65b	2.71	8.60	12.60
	سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار 3 tons of cotton biochar per hectare	0.28	2.41	2.57	9.0	12.80
	۱۵۰ کیلوگرم اوره + ۵۰ کیلوگرم فسفات در هکتار 150 kg of urea + 50 kg of phosphate per hectare	0.24	1.88	2.22	9.50	12.76
	۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره + ۳۷/۵ کیلوگرم فسفات در هکتار 112.5 kg of urea + 37.5 kg of phosphate per hectare	0.17	2.10	2.44	9.20	12.60
	۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم فسفات در هکتار + سه تن زغال زیستی گندم در هکتار 112.5 kg of urea per hectare + 37.5 kg of phosphate per hectare + 3 tons of wheat biochar per hectare	0.24	1.22	1.80	9.50	13.40
	۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم فسفات در هکتار + سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار 112.5 kilograms of urea per hectare + 37.5 kilograms of phosphate per hectare + 3 tons of cotton biochar per hectare	0.29	1.58	2.05	9.80	13.60
	LSD (0.05)	0.10	0.20	0.17	0.93	1.20

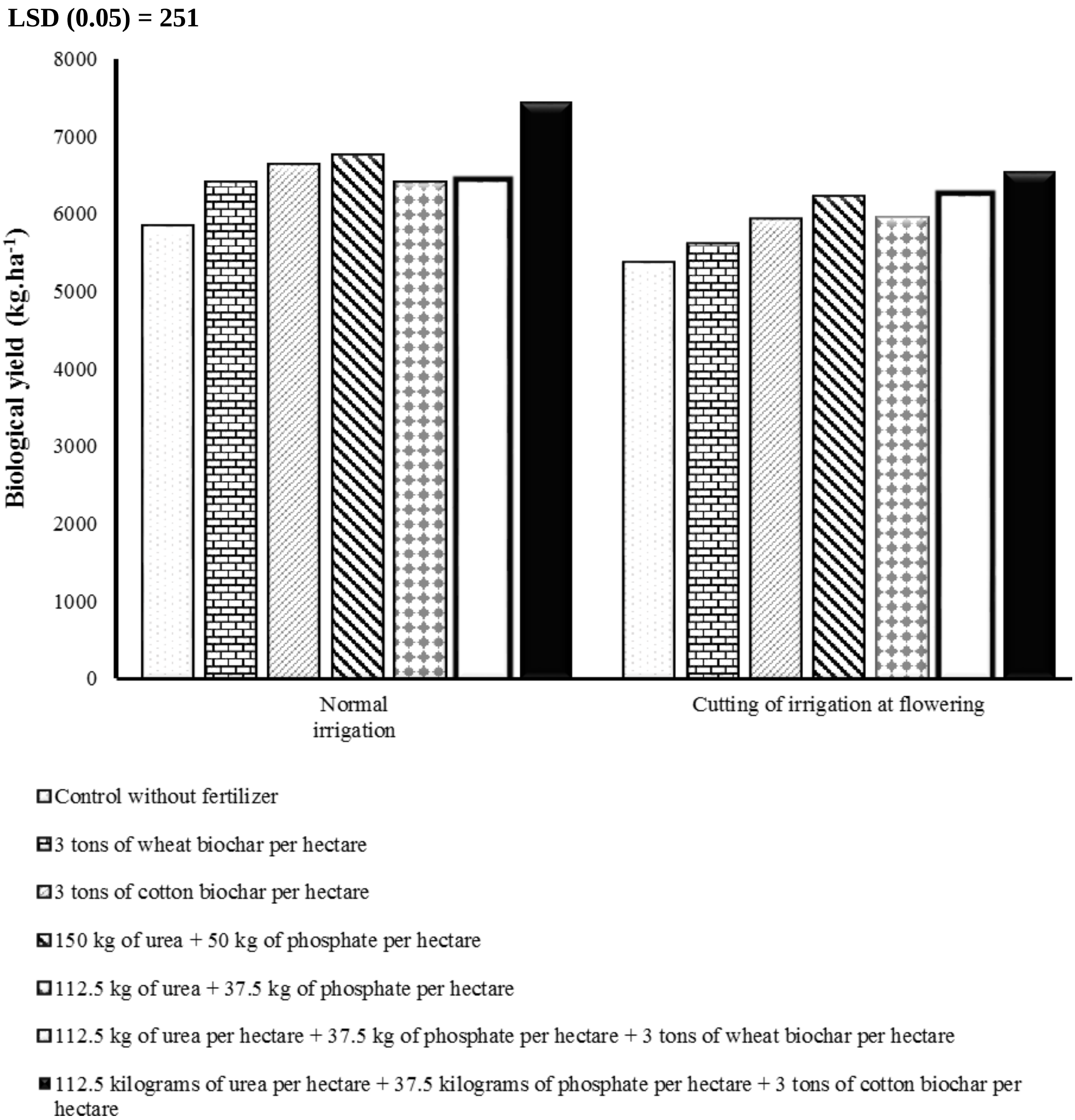


شکل ۱- اثر متقابل رژیم آبیاری و تیمار کودی بر محتوای نسبی آب برگ (RWC) گلرنگ

Fig. 1- The interaction effect of irrigation regime and fertilizer treatment on relative leaf water content (RWC) of safflower

همچنین، با کاربرد این تیمار در شرایط قطع آبیاری در گل‌دهی افزایش ۱۹/۵۱درصدی تعداد طبق بارور در بوته نسبت به شاهد بدون کود مشاهده شد (جدول ۶). تنش آبی، طول دوره رشد گیاه را کاهش داده و باعث تسریع در ورود به فاز زایشی شده و این امر موجب کاهش تعداد طبق در بوته می‌گردد، تنش آبی همچنین از رشد جوانه‌های جانبی و شاخه‌های فرعی بیشتر جلوگیری کرده و در نهایت، تعداد طبق در بوته را کاهش می‌یابد (Hayashi et al., 1985). برخی محققان نیز در پژوهشی گزارش کردند که تنش آبی باعث کاهش در تعداد طبق در بوته گلرنگ می‌شود (Shiresmaeili et al., 2017). در پژوهش حاضر، علت افزایش تعداد طبق بارور در بوته نیز همچون تعداد دانه در طبق، به‌دلیل مصرف تیمار تلفیقی با زغال زیستی پنبه می‌باشد. این تیمار باعث بهبود محتوای نسبی آب

برگ و همچنین موجب بالابردن آب قابل دسترس گیاه شده و در نتیجه، باعث افزایش اجزای عملکرد و عملکرد دانه شد.



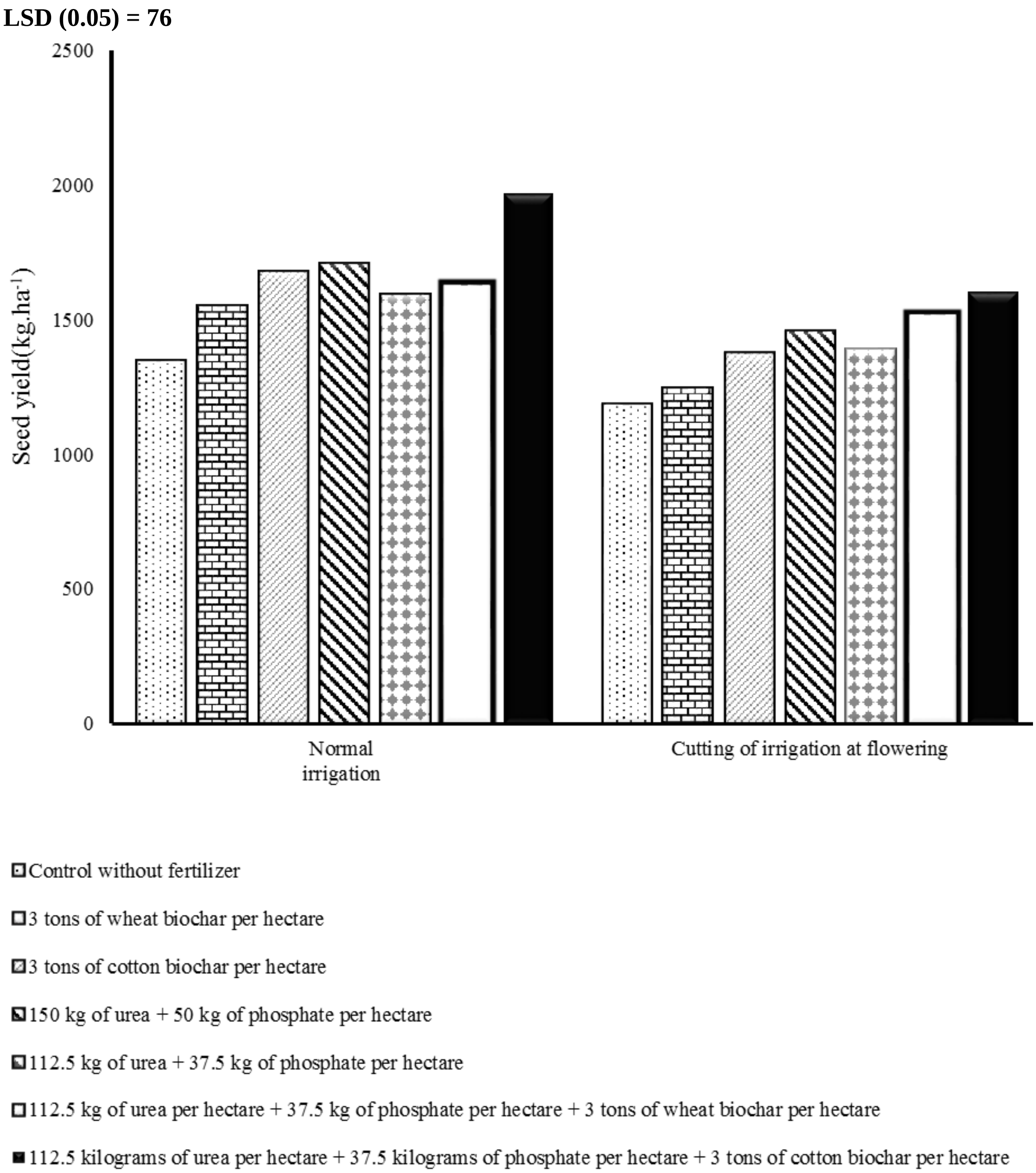
شکل ۲- اثر متقابل رژیم آبیاری و تیمار کودی بر عملکرد زیست‌توده گلرنگ

Fig. 2- The interaction effect of irrigation regime and fertilizer treatment on safflower biological yield.

عملکرد دانه

نتایج جدول تجزیه واریانس عملکرد دانه در جدول ۴ نشان داد که اثر متقابل رژیم آبیاری در تیمارکودی در سطح یک درصد دارای اختلاف آماری معنی‌داری می‌باشد. بیشترین عملکرد دانه مربوط به تیمار ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار + سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار در شرایط آبیاری مطلوب با میانگین ۱۹۷۰ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد که نسبت به شاهد بدون کود در شرایط مشابه با میانگین ۱۳۵۲ کیلوگرم در هکتار،۴۵/۷ افزایش عملکرد نشان داد (شکل ۳). در تیمار ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار + سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار در شرایط تنش آبی در مرحله گل‌دهی با میانگین ۱۶۰۳ کیلوگرم در هکتار بیشترین عملکرد حاصل

شد که نسبت به شاهد بدون کود در همین شرایط، با میـانگین ۱۱۹۰ کیلوگرم در هکتار، ۳۴/۷ درصد افزایش عملکرد مشاهده شـد (جـدول ۶).



شکل ۳- اثر متقابل رژیم آبیاری و تیمار کودی بر عملکرد دانه گلرنگ

Fig. 3- The interaction effect of irrigation regime and fertilizer treatment on safflower seed yield

کاربرد زغال زیستی گندم با کود اوره و فسفات به‌صورت تلفیقی و همچنین، استفاده از زغال زیستی پنبه به‌صورت جداگانه در شرایط تنش آبی، عملکرد را به‌ترتیب نسبت به شاهد ۲۷/۸۱ و ۱۶/۰۵ درصد افزایش دادند. گزارش شده است که با مصرف زغال‌زیستی به‌دلیل افزایش درصد اشباع بازی خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی و افزایش آب قابل دسترس گیاه، عملکرد ذرت از ۱۷ به ۲۱ تن در هکتار افزایش یافت (Cornelissen et al., 2013). براساس مطالعه پژوهشگران، افزودن زغال‌زیستی ذرت موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش پایداری خاکدانه و در نهایت، افزایش نگه‌داشت آب در خاک می‌شود (Herath et al., 2013). افزایش عملکرد با کاربرد زغال-زیستی در محیطهای کنترل شده و مزرعه نیز توسط محققین گزارش شده است (Blackwell et al., 2009). با کاربرد ۲/۵، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ تن در هکتار زغال‌زیستی حاصل از کاه گندم، در منطقه نیمه گرمسیری با میانگین بارندگی سالانه ۱۵۴۹ میلی‌متر، عملکرد کلزا به‌ترتیب نسبت به شاهد ۱۶/۲، ۲۱/۱، ۲۷/۹، ۲۴/۶، ۳۳/۲، ۳۶ درصد افزایش یافت (Liu et al., 2014). در پژوهش حاضر، مصرف تیمار ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار + ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار + سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار به‌دلیل بهبود ویژگی‌های مختلف خاک و تأمین بخشی از عناصر مورد نیاز گیاه (Najafi-Ghiri et al., 2022a) باعث افزایش عملکرد دانه شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش نشان داد که صفات اندازه‌گیری شده به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر رژیم آبیاری و تیمار کودی قرار گرفت. براساس نتایج به‌دست آمده، تنش آبی باعث کاهش محتوای کلروفیل a و کل، محتوای نسبی آب برگ و عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه گلرنگ شد و منجر به افزایش محتوای کاروتنوئید، آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز گردید. از سوی دیگر، کاربرد سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار همراه با ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار و ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار سبب بهبود و افزایش محتوای نسبی آب برگ، عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه در شرایط رژیم آبیاری نسبت به شاهد بدون کود به‌ترتیب به‌میزان ۵۳/۰۳، ۲۲/۰۵ و ۳۴/۷ درصد گردید. بنابراین، نتایج کلی این تحقیق نشان داد که استفاده از تیمار سه تن زغال زیستی پنبه در هکتار همراه با ۱۱۲/۵ کیلوگرم اوره در هکتار و ۳۷/۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار، در شرایط تنش آبی باعث بهبود محتوای نسبی آب برگ، صفات زراعی از جمله تعداد دانه در طبق، تعداد طبق بارور در بوته، عملکرد زیست‌توده (بیولوژیکی) و عملکرد دانه گلرنگ شد. با توجه به اینکه گیاهان زراعی در جنوب استان فارس با تنش آبی انتهای فصل روبه‌رو هستند، می‌توان تا حدودی با بهره‌گیری از زغال زیستی بقایای پنبه و گندم به تنهایی و یا توأم با کود اوره و سوپرفسفات تریپل، از اثرات تنش آبی کم کرد. در پایان، انجام پژوهش‌های بیشتر در ارتباط با تهیه و کاربرد زغال زیستی برای رشد سایر گیاهان زراعی و استفاده در بخش کشاورزی جهت افزایش تولید و کاهش مصرف نهاده‌ها پیشنهاد می‌شود.

References

1. Abbasi, M.K., & Anwar, A.A. (2015). Ameliorating effects of biochar derived from poultry manure and white clover residues on soil nutrient status and plant growth promotion-greenhouse experiments. *Plos One*, *10*(6), 1-18. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131592
2. Abdalla, M.M., & El-Khoshiban, N.H. (2007). The influence of water stress on growth, relative water content, photosynthetic pigments, some metabolic and hormonal contents of two *Triticum aestivum* cultivars. *Journal of Applied Sciences Research*, *3*, 2062-2074.
3. Adejumo, S.A., Owolabi, M.O., & Odesola, I.F. (2016). Agro-physiologic effects of compost and biochar produced at different temperatures on growth, photosynthetic pigment and micronutrients uptake of maize crop. *African Journal of Agricultural Research*, *11*, 661-673. http://dx.doi.org/10.5897/AJAR2015.9895
4. Aebi, H. (1984). Catalase *in vitro*. *In Methods in Enzymology*, *105*, 121-126. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3
5. Amiri, A., Sirousmehr, A.R., Yadollahi, P., Asgharipour, A.R., & Esmaeilzadeh Bahbadi S. (2016). Effect of drought stress and spraying of salicylic acid and chitosan on photosynthetic pigments and antioxidant enzymes in safflower. *Journal of Crops Improvement*, *18*, 2.453-466. (In Persian with English abstract)
6. Arnon, A.N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, *23*, 112-121.

7. Arvin, P., Vafabakhsh, J., & Mazaheri, D. (2017). Study of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and drought on physiological traits and ultimate yield of cultivars of oilseed rape (*Brassica* spp. L.). *Journal of Agroecology, 4*, 1208-1226. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jag.v9i4.61808
8. Asghari, B., & Gharibi Asl, S. (2016). The oil and protein content of Isfahan's safflower in different periods of irrigation, levels of humic acid and superabsorbent. *International Journal of Life Science and Pharma Research, 1*, 56-63.
9. Asqarpanh, J., & Kazemivash, N. (2013). Pharmacology and medicinal properties of (*Carthamus tinctorius* L). *Chines Journal of Integrative Medicine, 19(2)*, 53-59. https://doi.org/10.1007/s11655-013-1354-5
10. Azad Bakht, F., Ahmadi, K., & Omidi, H. (2017). Effect of late season drought stress on seed germination indices and photosynthetic pigments of native root genotypes (*Carthamus tinctrorius* L.) safflower. *Crop Physiology, 3*, 75-90. (In Persian with English abstract)
11. Barrsu, H. D., & Weatherley, P.E. (1962). Are-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, *15*, 413-4280. https://doi.org/10.1071/BI9620413
12. Bahadori, F., Bijanzadeh, E., & Behpuri, A. (2019). Investigating delayed cultivation on the re-transfer of cultured materials, yield components and yield of two safflower cultivars in the condition of interruption of irrigation. *Journal of Plant Production Research*, *28*(4), 85-104. https://doi.org/0.22069/JOPP.2021.17472.2612
13. Berek, A.K., Hue, N., & Ahmad, A. (2011). Beneficial use of biochar to correct soil acidity. *The Food Provider, 9*, 1-3.
14. Blackwell, P., Riethmuller, G., & Collins, M. (2009). Biochar application for soil. P 207-222, In: J. Lehman and S. Joseph (Eds.), Biochar for Environmental Management, Science and Technology. Eds Earthscan, London, Sterling, VA.
15. Borislev, M., Borislev, I., Zupunski, M., Arsenvo, D., Pajevic, S., Curcic, Z., Vasin, J., & Djordjevic, A. (2016). Drought impact is alleviated in sugar beets (*Beta vulgaris* L.) by foliar application of fullerenol nanoparticles. *Plos One, 10*, 1-20. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166248
16. Chalker-Scott, L. (2002). Do anthocyanins function as osmoregulators in leaf tissues? *Advances in Botanical Research, 37*, 103-106. https://doi.org/10.1016/S0065-2296(02)37046-0
17. Chang, C.C., Lee, H.L., & Hsu, S.H. (2013). Food security: Global trends and regional perspective with reference to East Asia. *The Pacific Review, 26*, 589-613. https://doi.org/10.1080/09512748.2013.842315
18. Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., & Joseph, S. (2008). Using poultry litter biochars as soil amendments. *Soil Research*, *46*(5), 437-444. https://doi.org/10.1071/SR08036
19. Cornelissen, G., Martinsen, V., Shitumbanuma, V., Alling, V., Breedveld, G.D., Rutherford, D.W., & Mulder, J. (2013). Biochar effect on maize yield and soil characteristics in five conservation farming sites in Zambia. *Agronomy*, *3*(2), 256-274. https://doi.org/10.3390/agronomy3020256
20. Daneshmand, A.R., Shirani Rad, A.H., & Ardakani, M.R. (2006). Evaluation of water deficit stress on tolerance of spring rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes. *Agronomy Research, 1*, 48-60. (In Persian with English abstract)
21. Das, R.C., Somanagouda, G., & Singh, B. (2017). Effect of Integrated Nutrient Management (INM) practices on growth, yield and oil yield of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Internatiol Journal of Current Microbiolgy and Applied Sciences, 6*, 511-516.
22. Ding, Z., Hu, X., Wan, Y., Wang, S., & Gao, B. (2015). Removal of lead, copper, cadmium, zinc and nickel from aqueous solutions by alkali-modified biochar: Batch and column tests. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *15*, 300-307. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.10.007
23. Flemmer, A.C., Franchini, M.C., & Lindstrom, L.I. (2015). Description of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) phonological growth stages according to the extended BBCH scale. *Annals of Applied Biology, 27*, 331-339. https://doi.org/10.1111/aab.12186
24. Flexas, J., Bota, J., Gales, J., Medrano, H., & Ribas- Carbo, M. (2008). Keeping a positive carbon balance under adverse conditions responses of photosynthesis and respiration to water stress. *Physiologia Plantarum*, *12*, 343-352. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00621.x
25. Gee, G.W., & Or, D. (2002). Particle size analysis. In: Methods of soil analysis Part 4 physical methods. Wisc. USA: Madison 255–293.
26. Ghosh, P.K., Ajay, K.K., Bandyopadhyay, M.C., Manna, K.G., Mandal, A.K., & Hati, K.M. (2004). Comparative effectiveness of cattle manure, poultry manure, phosphocompost and fertilizer NPK on three cropping system in

vertisoils of semi-arid tropics. Dry matter yield, nodulation, chlorophyll content and enzyme activity. *Bioresource Technology*, *95*, 85-93. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.011

27. Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal–A review. *Biology and Fertility of Soils*, *35*(4), 219-230. https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4
28. Gunes, A., Cicek, N., Inal, A., Alpaslan, M., Eraslan, F., Guneri, E., & Guzelordu, T. (2006). Genotypic response of chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars to drought stress implemented at pre-and post-anthesis stages and its relations with nutrient uptake and efficiency. *Plant Soil and Environment*, *52*, 868- 876. https://doi.org/10.17221/3454-PSE
29. Hayashi, H., & Hanada, K. (1985). Effects of soil water deficit on seed yield and yield components of safflower. *Japanese Journal of Crop Science*, *54*, 346-352. https://doi.org/10.1626/jcs.54.346
30. Helmke, P., Sparks, D., Page, A., Loeppert, R., Soltanpour, P., Tabatabai, M., Johnston, C., & Sumner, M. (1996). Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. Methods of soil analysis Part 3 chemical methods 551–574.
31. Herath, H.M.S.K., Camps-Arbestain, M., & Hedley, M. (2013). Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol. *Geoderma*, *209*, 188-197. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.016
32. Hassanpour Lescokelaye, K., Ahmadi, J., Daneshyan, J., & Hatami, S. (2013). Changes in chlorophyll, protein and antioxidant enzymes on durum wheat under drought stress. *Journal of Crop Breeding*, *1*, 76-87. (In Persian with English abstract)
33. Hosseinzadeh, S.R., Amiri, H., & Ismaili, A. (2016). Effect of vermicompost fertilizer on photosynthetic characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. *Photosynthetic*, *54*, 87-92.
34. Hussain, M.I., Lyra, D.A., Farooq, M., Nikoloudakis, N., & Khalid, N. (2016). Salt and drought stresses in safflower: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *36*(1), 4-18. http://dx.doi.org/10.1007/s13593-015-0344-8
35. Ippolito, J.A., Laird, D.A., & Busscher, W.J. (2012). Environmental benefits of biochar. *Journal of Environmental Quality*, *41*(4), 967-972. https://doi.org/10.2134/jeq2012.0151
36. Kafi, M., & Rostami, M. (2007). Yield characteristics and oil content of three safflower. *Iranian Journal of Field Crops Research*. *5*(1), 121-132. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/gsc.v5i1.903
37. Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota–A review. *Soil Biology and Biochemistry*, *43*(9), 1812-1836. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022
38. Lin, C.C., & Kao, C.H. (2006). Abscisic acid induced changes in cell wall peroxidase activity and hydrogen peroxide level in roots of rice seedlings. *Plant Science*, *2*, 323-329. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(00)00396-4
39. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of American Journal*, *42*, 421–428. https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x
40. Liu, F., Andersen, M.N., & Jensen, C.R. (2004). Root signal controls pod growth in drought stressed soybean during the critical, abortion sensitive phase of pod development. *Fields Crop Research*, *85*, 159-166. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00164-3
41. Liu, Z., Chen, X., Jing, Y., Li, Q., Zhang, J., & Huang, Q. (2014). Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil. *Catena*, *123*, 45-51. https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.07.005
42. Manya, J.J. (2012). Pyrolysis for biochar purposes: A review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environmental Science and Technology*, *46*, 15. 7939-7954. https://doi.org/10.1021/es301029g
43. Melo, C.A., Coscionc, A.R., Aberu, C.A., Puga, A.P., & Camargo, O.A. (2013). Influence of pyrolysis temperature on cadmium and zinc sorption capacity of sugar cane straw derived biochar. *Bioresources*, *8*(4), 4992-5004.
44. Mendez, A., Gomez, A., Paz-Ferreeiro, J., & Gasco, G. (2012). Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. *Chemosphere*, *89*, 1354-1359. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.092
45. Najafi-Ghiri, M., Bijanzadeh E., & Bahadori, F. (2022a). Effect of wheat-derived biochar on soil nutrients

availability and nutrients uptake by two safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars under water stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *53*, 1592-1606. https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2060251
46. Najafi-Ghiri, M., Bijanzadeh, E., & Ghaedi, M. (2022b). Soil potassium relations in an arid soil treated with biochar and chemical fertilizers after cultivation with safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under water stress. *Arid Land Research and Management*, *36*, 1-20. https://doi.org/10.1080/15324982.2022.2158960
47. Navabpour, S., Ramezanpour, S.S., & Mazandarani, A. (2015). Evaluation of enzymatic and non-enzymatic defense mechanism in response to drought stress during growth stage in soybean. *Technologies Crops Production*, *2*(15), 39-52.
48. Noroozi, M., & Kazemini, S.A.R. (2012). Effect of water stress and plant density on growth and seed yield of safflower. *Iranian Journal Field Crops Research. 10*, 781-788. (In Persian with English abstract)
49. Olsen S.R., (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. United States Department of Agriculture. Washington.
50. Peng, J., Han, X., Li, N., Chen, K., Yang, J., Zhan, X., Peyiu, L., & Liu, N. (2021). Combined application of biochar with fertilizer promotes nitrogen uptake in maize by increasing nitrogen retention in soil. *Biochar, 3*, 367-379. https://doi.org/10.1007/s42773-021-00090-6
51. Rahbarian, R., Khavari-Nejad, R., Ganjeali, A., Bagheri, A., Najafi, F., & Roshanfekr, M. (2012). Use of biochemical indices and antioxidant enzymes as a screening technique for drought tolerance in chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.). *African Journal of Agricultural Research*, *7*, 5372-5380. https://doi.org/10.5897/AJAR11.846
52. Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A.R., & Lehmann, J. (2012). Corn growth and nitrogen nutrition after addition of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils, 48*, 271-284. http://dx.doi.org/10.1007/s00374-011-0624-7
53. Rhoades, J.D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In: Methods of soil analysis Part 3 chemical methods. Wisc. USA: Madison. 417–435.
54. Sajedi, A., & Sajedi, N.A. (2018). Effect of application biochar and priming and foliar application with water and salicylic acid on physiological traits of dry land safflower. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *17*, 305-316. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22077/escs.2019.1823.1426
55. Santosa, C. (2004). Regulation of chlorophyll biosynthesis and degradation by salt stress in sunflower leaves. *Scientia Horticultura*, *10*, 93. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.04.009
56. Shiresmaeili, G., Maghsoudi mood, A.A., Khajoueinezhad, G., & Abdolshahi, R. (2017). Effect of irrigation cut treatment on yield and yield components of ten safflower cultivars in spring and summer crops. *Applied Research in Field Crops*, *30*(3), 1-17. (In Persian with English abstract)
57. Sirous Mehr, A., Bardel, J., & Mohammadi, S. (2014). Changes of germination properties, photosynthetic pigments and antioxidant enzymes activity of safflower as affected by drought and salinity stresses. *Journal of Crop Ecophysiology*, *4*, 517-534. (In Persian with English abstract)
58. Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, *105*, 47-82. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9
59. Sohi, S.P. (2012). Carbon storage with benefits. *Science*, *338*(6110), 1034-1035. https://doi: 10.1126/science.1225987
60. Song, W., & Guo, M.X. (2012). Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *94*, 138-145. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.018
61. Sun, Y., Gao, B., Yao, Y., Fang, J., Zhang, M., Zhao, Y., Chen, H., & Yang, L. (2014). Effect of feedstock type, production method and pyrolysis temperature on biochar and hydrobiochar properties. *Chemical Engineering Journal*, *240*, 574-578. https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.10.081
62. Taheri, S., Gholami, A., Abbasdokht, H., & Makarian, H. (2017). Alleviation of water deficit stress effects on safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars by seed priming. *Journal of Crops Improvement, 2*, 478-502. (In Persian with English abstract) . https://doi.org/10.22059/jci.2018.244528.1858
63. Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K.Y., Downie, A., Joseph, S., & Cowie, A. (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil, 327*(1), 235-246. http://dx.doi.org/10.1007/s11104-009-0050-x
64. Yang, X., Liu, J., McGrouther, K., Hung, H., Lu, K., Gao, X., He, L., Lin, X., Che, L., Ye, Z., & Wang, H. (2016).

Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) and enzyme activity in soil. *Environmental Science and Pollution Research*, *22*, 3183-3190. https://doi.org/10.1007/s11356-015-4233-0

65. Zhou, R., Yu, X., Ottosen, C.O., Rosenqvist, E., Zhao, L., Wang, Y., & Wu, Z. (2017). Drought stress had a predominant effect over heat stress on three tomato cultivars subjected to combined stress. *BMC Plant Biology*, *17*, 24-33. https://doi.org/10.1186/s12870-017-0974-x